

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка НАН України

DOI: <https://doi.org/10.59647/978-617-8800-28-4/1>

**МЕТОДИКА
НЕІНВАЗИВНОЇ ОЦІНКИ ФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ
ІНТРОДУКОВАНИХ ТА АВТОХТОННИХ РОСЛИН ЗА
ПОКАЗНИКАМИ ПІГМЕНТНОГО СКЛАДУ
(МРМ-100)**

Київ
Видавництво Ліра-К
2025

*Затверджено до друку вченою радою Національного ботанічного саду
імені М. М. Гришка НАН України (протокол № 11 від 02 жовтня 2025 р.)*

Атори:

Д.Б. Рахметов, О.П. Бондарчук, Н.М. Рашидов, С.Т. Османов, С.О. Рахметова

Рецензенти:

Б. В. Моргун – чл.-кор. НАН України

Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України

Я. В. Пірко – д.б.н.

ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України»

Відповідальний редактор –

чл.-кор. НАН України, професор **Рахметов Д. Б.**

Методика неінвазивної оцінки фізіологічного стану інтродукованих та автохтонних рослин за показниками пігментного складу (МРМ-100) / Д. Б. Рахметов, О. П. Бондарчук, Н. М. Рашидов та ін. – Київ : Видавництво Ліра-К, 2025. – 28 с.

ISBN 978-617-8800-28-4

Запропоновано методику, яка дозволяє оперативно та неінвазивно оцінювати стан інтродукованих та автохтонних рослин у польових умовах. Використання приладу МРМ-100 забезпечує комплексний підхід до аналізу пігментного складу, поєднуючи точність лабораторних вимірювань із мобільністю польових досліджень. Це створює підґрунтя для ефективного моніторингу, підвищення об'єктивності добору перспективних видів, форм, сортів та гібридів рослин і розробки науково обґрунтованих рекомендацій щодо їх введення в культуру, вирощування та використання фітогенетичного різноманіття корисних рослин в Україні. У роботі зроблено аналіз сучасних приладів з оцінки пігментного складу вегетативних та генеративних органів рослин. Представлено особливості проведення досліджень з експрес-оцінки фізіологічного стану інтродукованих та автохтонних рослин. Наведено інформацію про проведення експрес-оцінки фізіологічного стану рослин. Представлено матеріал щодо вилучення та обробки отриманих даних. Подано інтерпретація результатів досліджень.

Для біологів, ботаніків, екологів, рослинників, садівників, викладачів, аспірантів і студентів

УДК 581.1:631.524.86:57.083.3

Друкується в авторській редакції.

Відповідальність за достовірність наданого для видання матеріалу автори несуть одноосібно.

Будь-яке відтворення тексту без згоди авторів та видавництва забороняється

ISBN 978-617-8800-28-4

© Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка, 2025

© Рахметов Д. Б., Бондарчук О. П., Рашидов Н.М. та ін., 2025

© Видавництво Ліра-К, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРИЛАДІВ ЩОДО СКРИНІНГУ ПІГМЕНТНОГО СКЛАДУ ВЕГЕТАТИВНИХ ТА ГЕНЕРАТИВНИХ ОРГАНІВ РОСЛИН	7
РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ З ЕКСПРЕС-ОЦІНКИ ФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ІНТРОДУКОВАНИХ ТА АВТОХТОННИХ РОСЛИН	11
РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПРЕС-ОЦІНКИ ФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ІНТРОДУКОВАНИХ ТА АВТОХТОННИХ РОСЛИН	17
РОЗДІЛ 4. ВИЛУЧЕННЯ ТА ОБРОБКА ОТРИМАНИХ ДАНИХ.....	19
РОЗДІЛ 5. ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	24
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	25
ДОДАТКИ.....	26

ВСТУП

Останні десятиліття інтродукція рослин набула особливої актуальності у зв'язку з глобальними кліматичними змінами та необхідністю збереження біорізноманіття. Вона забезпечує розширення генофонду культурних та дикорослих видів, створює основу для пошуку нових харчових, лікарських, декоративних тощо рослин. Інтродуценти можуть стати джерелом підвищення стійкості агроєкосистем, сприяти рекультивації деградованих земель і зміцненню екологічної стабільності. Вивчення механізмів їхньої адаптації дозволяє глибше розкрити закономірності фізіолого-біохімічних процесів та взаємодії організмів з новим середовищем. У практичному аспекті інтродукція відкриває шляхи до збагачення ресурсної бази та поліпшення умов життя людини, поєднуючи фундаментальну науку з прикладними завданнями сталого розвитку.

Активне вивчення та впровадження у культуру нових, маловідомих та малопоширених видів рослин зумовлює необхідність оперативної оцінки їх фізіологічного стану. Традиційні методи аналізу, що ґрунтуються на відборі проб та лабораторних дослідженнях, потребують значних затрат часу й ресурсів, що ускладнює моніторинг великої кількості зразків у польових умовах. Тому все більшої актуальності набувають експрес-методи, здатні забезпечити швидку та відтворювану інформацію про адаптивний потенціал рослин.

Важливими показниками стійкості й життєздатності інтродуцентів є вміст основних пігментів – хлорофілу, антоціанів і флавонолів, які відображають стан фотосинтетичного апарату, рівень стресового навантаження та особливості метаболічної відповіді на умови довкілля. На основі поєднання даних про концентрацію цих сполук та азот-флавоноїдного індексу (NFI)

можна комплексно оцінити рівень забезпеченості рослин елементами живлення, їх інтродукційний потенціал, адаптаційну здатність і перспективи подальшого введення в культуру, вирощування та використання фітогенетичного різноманіття корисних рослин в Україні.

Використання портативного мультипигментного аналізатора MPM-100 / Multi-Pigment Meter відкриває можливості для проведення таких вимірювань без пошкодження зразків, у польових умовах та з високою точністю. Прилад поєднує методи співвідношення флуоресценції та світлопропускної спроможності у різних спектральних діапазонах, що дозволяє отримувати комплекс даних упродовж кількох секунд. Це робить його ефективним інструментом у створенні методики експрес-оцінки інтродукованих та автохтонних рослин, спрямованої на підвищення об'єктивності та швидкості моніторингових досліджень. Тому розробка й апробація методики щодо експрес-оцінки стану досліджуваних рослин шляхом визначення вмісту основних пігментів (хлорофілу, антоціанів, флавонолів) та азот-флавоноїдного індексу з використанням портативного аналізатора MPM-100 (ADC BioScientific Ltd, UK) сьогодні набуває особливої актуальності.

Запропонована методика є одним із перших узагальнених підходів до використання мультипигментного аналізатора MPM-100 для оцінки фізіологічного стану інтродукованих та автохтонних рослин у польових умовах. Її новизна полягає в інтеграції показників різних груп пігментів у єдину систему оцінки адаптивності рослин, що дозволяє поєднати швидкість аналізу з науковою точністю.

Робота складається з вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел та додатків. У розділі 1 зроблено аналіз сучасних приладів щодо скринінгу пігментного складу вегетативних та генеративних органів рослин. У другому розділі

представлено особливості проведення досліджень з експрес-оцінки фізіологічного стану інтродукованих та автохтонних рослин. У розділі 3 наведено інформацію про проведення експрес-оцінки фізіологічного стану інтродукованих рослин. У четвертому розділі представлено матеріал щодо вилучення й обробки отриманих даних. У розділі 5 подано інтерпретація результатів досліджень.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРИЛАДІВ ЩОДО СКРИНІНГУ ПІГМЕНТНОГО СКЛАДУ ВЕГЕТАТИВНИХ ТА ГЕНЕРАТИВНИХ ОРГАНІВ РОСЛИН

Сучасні портативні оптичні прилади для визначення пігментного складу листка (хлорофіл, флавоноли, антоціани) та похідних індексів застосовують різні фізичні підходи (світлопропускання, відношення флуоресценції, мультиспектральне збудження). Ці прилади призначені для швидкої, неінвазивної діагностики фізіологічного стану та азотного постачання рослин у польових умовах. Однак їхні можливості, точність і застосування залежать від конструкції і принципу дії конкретного пристрою.

Огляд портативних аналізаторів пігментного складу рослин, представлених на світовому ринку, дозволив виділити ряд окремих їх переваг та недоліків, які слід враховувати при виборі відповідного приладу.

MPM-100 (Opti-Sciences / ADC) – багатоцільовий портативний прилад для одночасного визначення хлорофілу, флавонолів та антоціанів і розрахунку NFI (Nitrogen-Flavonol Index). Використовує поєднання ratio-fluorescence та transmittance: флуоресцентні світлодіоди для збудження й інфрачервоні/червоні джерела для пропускання. Прилад характеризується високою швидкістю тестування рослинних зразків (≈ 5 с), вимірювання неінвазивні, що дозволяє зберігати досліджуваний зразок упродовж його онтогенезу, площа аналізуючого детектора складає близько 9,5 мм, похибка заявлена на рівні ± 1 %. Підтримка збереження даних у CSV і GPS-даних у деяких реалізаціях.

Переваги полягають у комплексному наборі індексів (хлорофіл + флавоноли + антоціани) корисний для експрес-оцінки адаптації/стресу рослин, зручний для польових досліджень та не потребує пошкодження досліджуваних зразків. Недоліком вважають відносно малу площу вимірювальної ділянки, а також на товстих, нерівних, або глибоко розсічених листках слід дотримуватись особливих процедур відбору і додаткового калібрування.

SPAD-502Plus (Konica Minolta) – портативний прилад для визначення вмісту хлорофілу в листках, який широко використовується у сільському господарстві для вимірювання відносного SPAD-індексу по двох довжинах хвиль (поглинання). Переваги полягають у його водостійкості, компактності, простоті використання, добре відомий у фермерських практиках. Одним із основних недоліків є те, що він вимірює лише «хлорофіл-індекс» – не дає інформації про флавоноли/антоціани; чутливий до структури листка (товщина) – потрібно багато повторів/нормалізація.

CCM-300 (Opti-Sciences) – прилад на основі fluorescence-ratio, який забезпечує прямий readout хлорофілу в $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ у значно ширшому діапазоні (наприклад, $41\text{--}675 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$), що робить його придатним для оцінки різних видів рослин (хвойних, листяних тощо). Прилад добре підходить для охоплення найнижчих та найвищих концентрацій хлорофілу (наприклад, від проростків до дорослих листків), отримані аналітичні дані краще корелюють із хімічними аналізами. Також основним недоліком вважається те, що він орієнтований переважно на хлорофіл і не дає показників багатопігментного профілю, як MPM-100 чи Multiplex.

Dualex (Force-A) – портативний leaf-clip метр для одночасного визначення хлорофілу та епідермальних поліфенолів (флавонолів), з обчисленням індексів типу NBI (Nitrogen Balanced Index). Важливою якістю приладу є прямий індикатор флавоноїдів,

який корисний для вивчення захисних реакцій на УФ-стрес та діагностики азотного дефіциту у поєднанні з хлорофілом. Основним недоліком приладу є те, що він може потребувати калібрування під конкретні культури та не завжди «вловлює» специфіку антоціанів у деяких режимах.

MULTIPLEX®/Multiplex 3 (Force-A/партнери) – мультипараметричний флуориметр, що вимірює багато флуоресцентних сигналів (до 9) та розраховує індекси хлорофілу, флавонолів, антоціанів, BGF тощо, а деякі версії мають велику площу поверхні аналізуючого детектора (Research версії). Переваги приладу полягають у високій швидкості сканування (часто <1 с) та великому наборі індексів для різного застосування (всі види листків, фруктів, ягід тощо); активне збудження дозволяє роботу при будь-якому освітленні. Головним із недоліків є складність у інтерпретації результатів скринінгу, для багатьох індексів потрібен досвід та калібрування під конкретні дослідження.

MultispeQ (PhotosynQ) – комплексний, модульний пристрій (флуориметр, спектрометр, додаткові сенсори) з мережевою платформою PhotosynQ для збирання та обробки даних. Переваги: відкритість, модифікованість, велика програмна екосистема, ідеально підходить для масштабних наукових проєктів і краудсорсингових ініціатив, великий набір сенсорів і метрик. Із недоліків вважають підвищені вимоги до обробки даних, оскільки не завжди «plug-and-play» зрозумілий для пересічного користувача. Він орієнтований переважно на науковців.

Yara N-Tester (N-Tester BT) – польовий інструмент для швидкої оцінки азотного статусу листка (через аналіз хлорофілу/зеленості), інтегрується з додатками та рекомендаціями Yara (агрономічний підхід). Переваги: інтеграція в агрономічні рекомендації, простота використання, Bluetooth підключення до додатків. Основним недоліком є те, що прилад

орієнтований саме на азот/підживлення – не забезпечує комплексної оцінки пігментного профілю.

Отже, аналіз спектру приладів щодо експрес-оцінки рослин дав можливість з'ясувати їх основний функціонал, переваги та недоліки у використанні та на цій основі скласти порівняльну таблицю (Додаток 1). Зважаючи на вище вказане можна зробити висновок, що для комплексної оцінки адаптивності інтродукованих та автохтонних рослин (хлорофіл + флавоноли + антоціани) необхідно використовувати MPM-100, Dualex, або Multiplex. Вони дають багатопараметричний профіль, необхідний для інтерпретації стрес-реакцій і адаптації рослинного організму.

Подальший розвиток портативних флуориметрів і мультипігментних сенсорів спрямований на мініатюризацію пристроїв, розширення спектральних діапазонів та інтеграцію з мобільними додатками. Це відкриває перспективу створення повноцінних систем моніторингу «plant-to-cloud», коли дані з польових вимірювань автоматично передаватимуться у хмарні бази для аналізу та прогнозування адаптаційного потенціалу рослин.

РОЗДІЛ 2.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ З ЕКСПРЕС-ОЦІНКИ ФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ІНТРОДУКОВАНИХ ТА АВТОХТОННИХ РОСЛИН (МРМ-100)

Для оцінки фізіологічного стану рослин за пігментним профілем в умовах інтродукції варто визначити конкретну ціль, яку хоче досягти науковець, або агроном. З метою розробки фундаментальних засад введення в культуру нових видів, сортів, форм та гібридів рослин та комплексного дослідження їх стану на конкретних ґрунтово-кліматичних умовах необхідно проводити скринінг пігментів упродовж вегетації залежно від фази розвитку (з моменту проростання до завершення плодоношення). Такий підхід дозволить простежити динаміку метаболічного процесу у рослин – залежно від їх онтогенетичного стану, впливу погодно-кліматичних умов довкілля і різного роду шкочочинних організмів та в цілому умов вегетації рослин. Якщо метою є дослідження фізіологічного стану рослин в реальному часі та своєчасного створення необхідних умов для його покращення (застосування зрошення, добрив, засобів для боротьби із шкідниками, хворобами тощо), то прилад можна використовувати у випадку будь-якого прояву тих чи інших проблем. В обох випадках обирають життєздатні листки або інші фотосинтетично активні органи рослини, головне щоб площа досліджуваного органу рослини повністю покривала робочу область оптичного детектора. Вимірювання бажано здійснювати в однаковий час доби (вранці або в першій половині дня), у суху погоду, обирати листки, пагони або плоди типові для конкретної фази розвитку рослини.

Отже, для проведення експериментальних досліджень спочатку необхідно ознайомитися із будовою приладу (рис. 1). MPM100 – це портативний польовий прилад для вимірювання пігментів. Він може використовуватися для вимірювання оптичної пропускнуї здатності та флуоресцентних характеристик будь-яких тонких, плоских матеріалів. Діаметр вимірювальної області зразка становить 9,5 мм. Верхня вимірювальна головка містить п'ять джерел світла та фільтрований детектор. Три джерела призначені для збудження флуоресценції, два – для вимірювання пропускнуї здатності. Відфільтрований детектор налаштований на цільовий флуорофор. Нижня вимірювальна головка містить широкосмуговий детектор, який використовується для вимірювання світла, що пройшло крізь листок (пропускання).

Наведені користувачем формули обчислюють кінцеві значення. Це дозволяє розробляти та впроваджувати спеціальні тести. Прилад містить високопродуктивний реєстратор даних, сенсорний кольоровий РК-екран із діагоналлю 3,2 дюйма, USB-з'єднання, вбудований GPS-приймач і 2 ГБ пам'яті внутрішніх даних.



Рис. 1. Будова мультипігментного аналізатора MPM-100 (ADC BioScientific Ltd, UK).

Принцип роботи приладу. На початку тесту починають мерехтати три світлодіоди, і результати флуоресценції реєструються верхньою головкою приладу. Спалахи світла дуже короткі, щоб мінімізувати будь-який вплив на досліджуваний зразок. Потім виконуються вимірювання пропускання, блимаючи двома світлодіодами, що залишилися, і реєструється сигнал на нижній головці зразка.

Флуоресцентні світлодіоди та детектор відкалібровані на листку для нормалізованої реакції. Прямий оптичний зворотній зв'язок використовується для компенсації відхилень. Відносні зміни між каналами флуоресценції зведені до мінімуму, оскільки флуоресценція збуджується та проявляється на одній зі сторін зразка, що призводить до відсутності руху між джерелами і детектором. Зсув сигналу флуоресценції реєструється під час калібрування. Це значення використовується для компенсації можливого забруднення верхнього вікна. Коефіцієнт пропускання також калібрується та використовується для компенсації невеликих механічних відхилень, спричинених затискачами зразка.

Флуоресцентна система має динамічний діапазон приблизно двох порядків величини. Підсилювач зі змінним коефіцієнтом посилення розширює абсолютний діапазон у 32 рази. Ця зміна посилення однаково застосовується до всіх трьох каналів. Система пропускання має динамічний діапазон приблизно трьох порядків величини.

Меню аналізатора наповнено комплексом кнопок (рис. 2), які дозволяють підготувати прилад до роботи (здійснити калібрування перед експрес-оцінкою рослин, створити теки і файли, на яких зберігатимуться у зашифрованому вигляді результати аналізу, видалити непотрібні елементи тощо). Кнопки із зеленою рамкою можна натискати, інші кольори

використовуються для інформації або попереджувальних повідомлень.

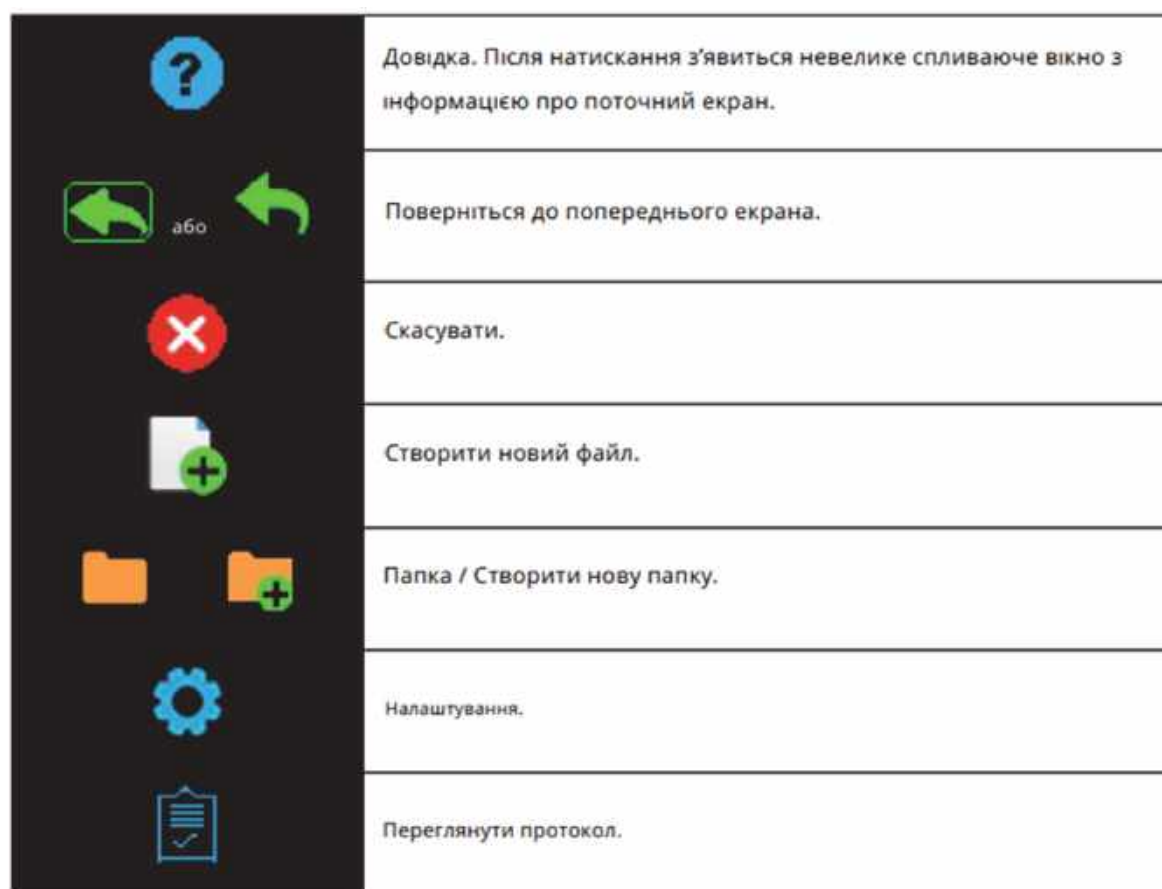


Рис. 2. Кнопки меню екрану та їх функціонал

Варто також зазначити, що там, де це можливо, пристрій буде спрямовувати користувача і надавати йому підказки для виконання важливих дій.

Прилад оснащено рядом піктограм які мають важливі функції для отримання даних щодо оцінки фізіологічного стану рослин (рис 3.). Аналізатор можна використовувати для досліджень за замовчуванням (використовуючи протокол запропонований виробником), а також налаштувати, створивши до трьох різних власних протоколів. Встановлені протоколи відображаються у верхньому рядку значків.



Рис. 3. Загальний вигляд екрану та значки

Основна операція тестування між протоколами однакова, відмінності полягають лише у формулах, які використовуються для обчислення даних. Якщо протоколи користувача не встановлено, то на екрані з'явиться значок загальних тестів. Натискання піктограми протоколу дозволяє запустити режим тестування. Піктограма «Провідник файлів» дозволяє переглядати та передавати через USB або видаляти збережені дані. За допомогою «Налаштування системи» створюються протоколи, автоматичне вимкнення приладу та звукові відгуки, тощо. Додатково також можна налаштувати час натиснувши на «Годинник», відстежувати рівень заряду акумулятора на піктограмі «Діагностика», а також поточний стан GPS.

Перед початком вимірювання пігментного профілю MPM-100 проводиться калібрування мультипігментного аналізатора, який налаштовують з метою перевірки працездатності сенсорів і пам'яті. Після завершення калібрування обираємо перехід у сховище, а потім – на верхній панелі екрану – створення теки або

файлу, де будуть в майбутньому зберігатися результати тестів (рис. 4).

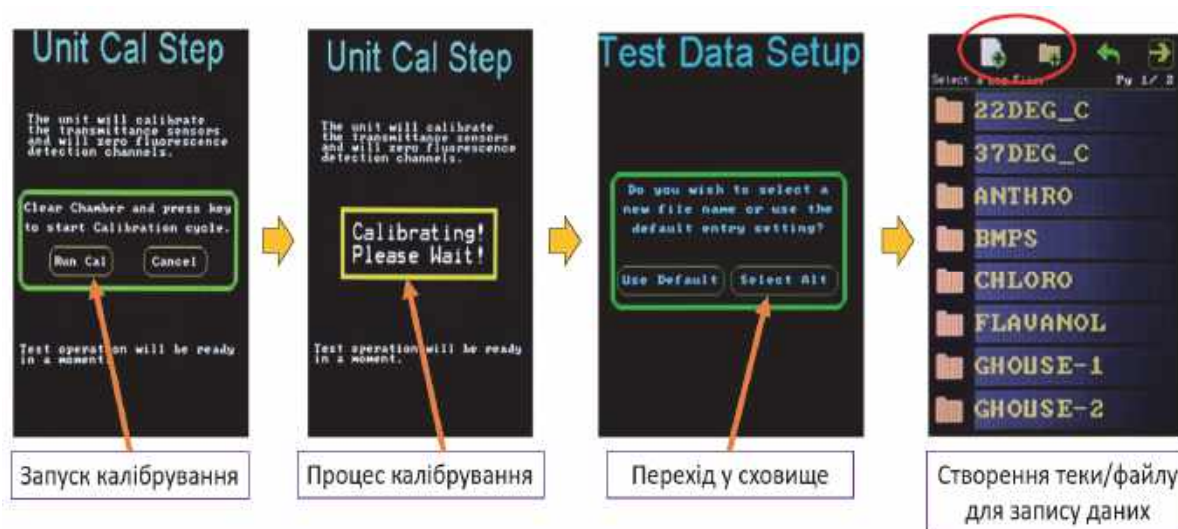


Рис. 4. Етапи підготовки мультипигментного аналізатора до тестування рослин

Для достовірності результатів важливо враховувати просторову неоднорідність популяції рослин. Тому під час експрес-оцінки рекомендується проводити не менше 20–30 вимірювань на варіанті зразка (виду/культури, сорту, форми, гібриду), охоплюючи різні частини експериментальної ділянки. Це знижує вплив локальних факторів (грунтової неоднорідності, затінення, мікроклімату) та підвищує репрезентативність даних.

РОЗДІЛ 3.

ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПРЕС-ОЦІНКИ ФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ІНТРОДУКОВАНИХ ТА АВТОХТОННИХ РОСЛИН

Після калібрування та створення теки/файлу для зберігання результатів аналізу зразків, прилад переходить в режим тестування (рис. 5).

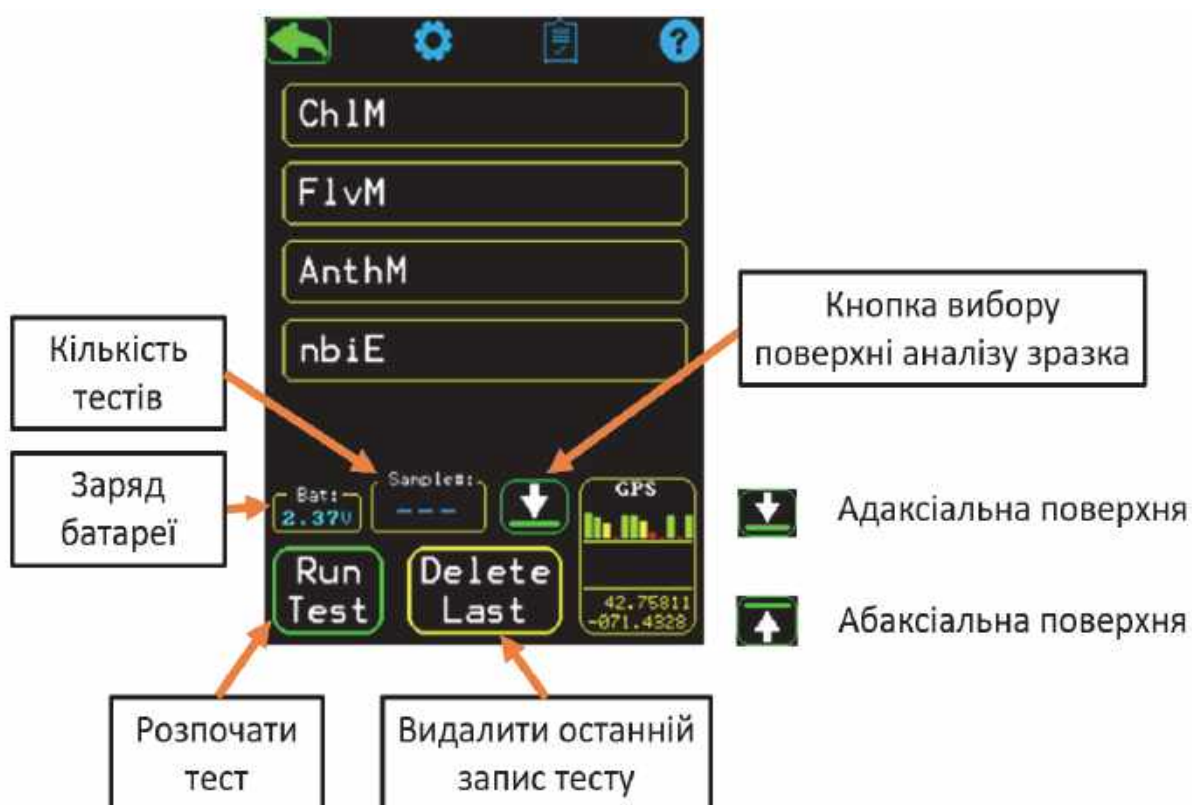


Рис. 5. Вигляд меню в режимі тестування

Під час проведення тесту рослин спочатку необхідно обрати поверхню яка буде проаналізована шляхом натискання кнопки «Вибір поверхні зразка», далі починаємо тестування, яке автоматично записується у створений файл. У випадку якщо ця дія здійснена неправильно, кожен запис можна видалити і продовжити роботу далі. Рекомендується провести сканування –

від 5 до 10 повторів на одному екземплярі, – з подальшим обчисленням середнього значення. Орієнтовний час вимірювання одного зразка становить близько 5 секунд.

Хлорофіл (T850/T720): визначає фотосинтетичний потенціал та рівень азотного живлення рослини. Флавоноли (F660/F325): маркер захисних реакцій на ультрафіолетове випромінювання та індикатор азотного дефіциту. Антоціани (F660/F525): свідчать про реакцію рослини на температурні та інші стреси, а також виконують роль у привабленні запилювачів. Азот-флавоноїдний індекс (NFI): інтегральний показник, що поєднує дані про хлорофіл і флавоноли та дає більш стабільну характеристику азотного статусу незалежно від віку рослини.

РОЗДІЛ 4.

ВИЛУЧЕННЯ ТА ОБРОБКА ОТРИМАНИХ ДАНИХ

Результати тестування зразків рослин зберігаються у форматі *.csv і опрацьовуються у табличних редакторах Excel, R та Python. Для кожного виду (культури), сорту, форми та гібриду формується масив даних, який після розкодування та переформатування екстрагується у потрібну програму, де відбувається порівняння між особинами, різними ділянками та контрольними варіантами.

Екстрагований файл зі сховища мультипігментного аналізатора відкриваємо, використовуючи програму Microsoft Excel (рис. 6) та покроково здійснюємо переформатування даних:

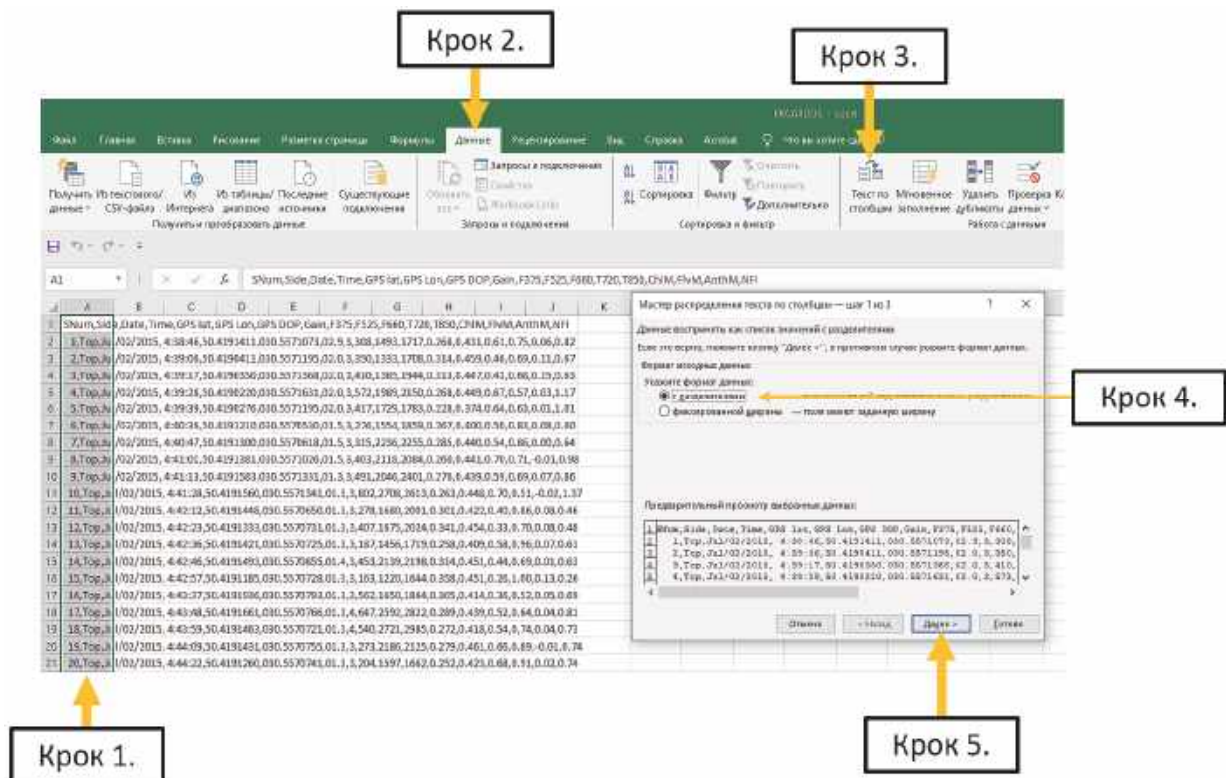


Рис. 6. Розшифрування результатів тестів та переведення їх у доступний для обчислення формат

Крок 1. – виділяємо першу колонку даних з усіма записами;
 Крок 2. – курсивом миші клікаємо на кнопку «Дані»;
 Крок 3. – обираємо кнопку «Текст по стовпчиках» після чого у нас з'являється на екрані вікно «Майстер розподілу по стовпчиках»;
 Крок 4. – у розділі «формат даних» встановлюємо позначку навпроти пункту «З розподілом»;
 Крок 5. – курсивом миші клікаємо кнопку «Далі».

У наступному діалоговому вікні встановлюємо відмітки символів розподілу: знак табуляції, крапка з комою, кома і переходимо далі до наступного діалогового вікна. Для того щоб задати для кожного стовпчика формат даних виділяємо усі стовпчики, ставимо відмітку «Текстовий» і натискаємо на кнопку «Готово» (рис. 7).

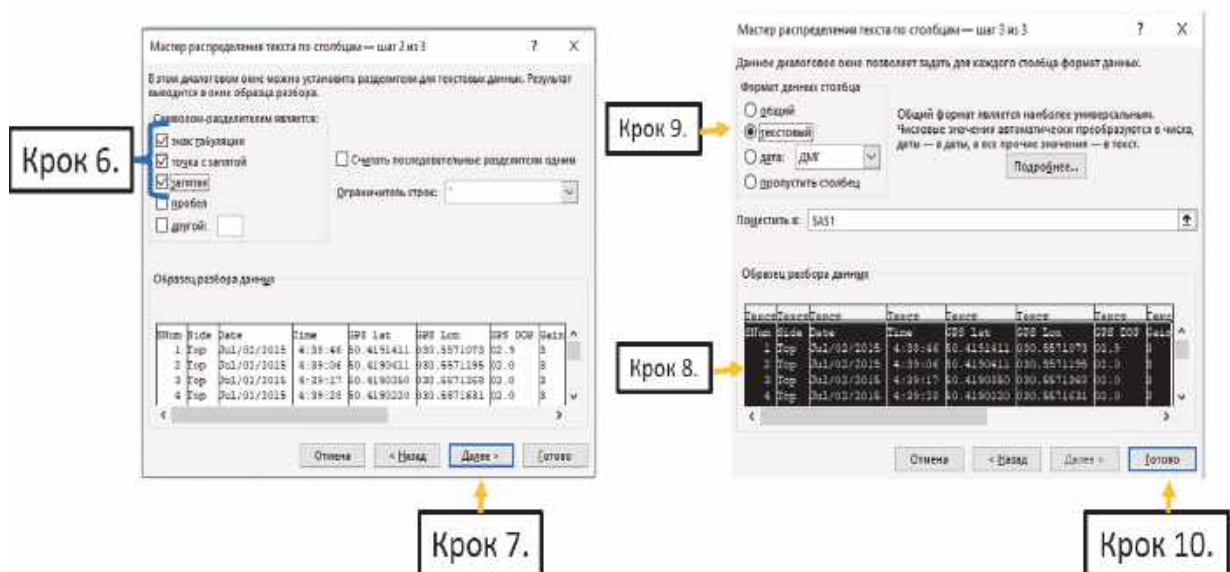


Рис. 7. Встановлення розділяючих знаків для стовпчиків та формат їх даних

Таким чином, у результаті покрокової обробки зашифрованих мультипигментним аналізатором даних тесту

отримуємо у числовому виразі дані у таблицях Microsoft Excel. Далі проводиться обчислення середніх, медіанних та варіаційних показників у зручній для користувача статистичній програмі.

Для коректної інтерпретації даних мультипигментного аналізатора MPM-100 необхідно застосовувати методи статистичної обробки. Це дозволяє мінімізувати випадкові похибки, підвищити обґрунтованість висновків та виявити закономірності, котрі не завжди очевидні при простому перегляді даних.

1. Первинна статистична обробка

На першому етапі для кожного зразка або варіанту обчислюють:

- **середнє арифметичне (M)** – характеризує типовий рівень показника;
- **стандартне відхилення (SD)** – відображає розсіювання значень навколо середнього;
- **коефіцієнт варіації (CV, %)** – показує рівень мінливості (до 10 % – низька, 10–20 % – середня, понад 20 % – висока).

Ці параметри дозволяють оцінити стабільність пігментних показників у межах виду (культури), сорту чи популяції рослин.

2. Порівняльний аналіз

Для виявлення достовірних відмінностей між варіантами застосовують:

- **t-тест Стюдента** – для двох вибірок;
- **ANOVA (дисперсійний аналіз)** – для кількох груп;
- **пост-хок тести (Tukey HSD, LSD)** – для визначення, між якими саме групами існують відмінності.

Це особливо важливо при порівнянні інтродукованих рослин різного походження або автохтонних рослин з різних фізико-географічних зон. При порівнянні сортів створених у різних екологічних умовах це також дуже актуально.

3. Кореляційний та регресійний аналіз

Використовується для встановлення взаємозв'язку між пігментними показниками:

- **кореляція Пірсона (r)** – визначає силу і напрям зв'язку (наприклад, між хлорофілом і NFI);

- **лінійна/нелінійна регресія** – дозволяє прогнозувати значення одного параметра за іншим.

4. Багатовимірний аналіз

Для комплексної оцінки великої кількості даних рекомендується застосовувати:

- **РСА (аналіз головних компонентів)** – зменшує кількість змінних і виділяє головні фактори, що пояснюють більшість варіацій;

- **кластерний аналіз** – групує зразки за подібністю пігментних профілів, що зручно для відбору перспективних інтродуцентів, автохтонних рослин або генотипів, сортів.

5. Візуалізація результатів

Графічне подання значно полегшує інтерпретацію:

- діаграми розсіяння (scatter plots) для кореляцій;
- box-plots для порівняння груп;
- дендрограми або heatmap – для кластерного аналізу.

Приклад таблиці отриманих результатів

Вид/сорт	Хлорофіл ($M \pm SD$)	Флавоноли ($M \pm SD$)	Антоціани ($M \pm SD$)	NFI ($M \pm SD$)	CV (%)
Зразок 1	0.65 $\pm$ 0.05	0.12 $\pm$ 0.02	0.09 $\pm$ 0.01	0.80 $\pm$ 0.04	6.3
Зразок 2	0.48 $\pm$ 0.08	0.18 $\pm$ 0.03	0.14 $\pm$ 0.02	0.61 $\pm$ 0.05	12.5
Зразок 3	0.72 $\pm$ 0.04	0.09 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.01	0.88 $\pm$ 0.03	5.6

Представлення даних у такій формі полегшує подальший аналіз і дозволяє швидко визначити стійкіші та перспективніші зразки для інтродукції або селекції рослин.

РОЗДІЛ 5.

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Кожен із показників який фіксує дослідник дозволяє оцінити фізіологічний стан рослини наприклад: високий вміст хлорофілу свідчить про хорошу забезпеченість рослини або культурфітоценозу азотом, а також їх високий фотосинтетичний потенціал; підвищення флавонолів та антоціанів – це відповідь організму рослин на стресові фактори (дефіцит азоту, надлишок освітлення, температурні коливання тощо); зниження індексу NFI – свідчить про нестачу азоту, що може бути критичним для адаптації інтродукованих чи автохтонних рослин, а також селекційних зразків.

Порівняльний аналіз отриманих результатів щодо вмісту метаболітів у різних видів (культур), форм, сортів і гібридів рослин, дозволяє визначити стійкіші та перспективніші для подальшого введення в культуру нових видів і відібраних генотипів рослин.

Отже, на основі комплексного аналізу рослин, їх природних, інтродукційних або селекційних популяцій формуються висновки про адаптивність, рівень стійкості до біотичних та абіотичних чинників і потенційну продуктивність досліджуваних рослин. Методика дозволяє оперативно оцінити стан рослин у польових умовах без необхідності відбору та знищення зразків.

Практичного застосування MPM-100:

- у селекційній роботі (відбір стійких генотипів);
- у сільському господарстві (оперативне виявлення дефіциту азоту чи води);
- у геоботанічних та інтродукційних дослідженнях (моніторинг стану рослин у природних і культурних ценозах).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

MPM-100 – Multi pigment meter. *Opti-Sciences Inc.* URL: https://opti-sciences.com/products/content-meters/mpm-100/?utm_source=chatgpt.com

MPM-100 – Multi-Pigment Meter. *ADC BioScientific Ltd.* URL: https://www.adc.co.uk/products/mpm-100-multi-pigment-meter/?utm_source=chatgpt.com

SPAD-502Plus. *Konica Minolta.* URL: https://sensing.konicaminolta.eu/mi-en/products/colour-measurement/chlorophyll-meter/spad-502plus?utm_source=chatgpt.com

CCM-300 – Chlorophyll Content Meter. *Opti-Sciences Inc.* URL: https://opti-sciences.com/products/content-meters/ccm-300/?utm_source=chatgpt.com

Dualex Scientific™ Optical pigment sensor. URL: https://bio4safe.eu/sites/default/files/2021-08/Leaflet_DualexScientific_English.pdf?utm_source=chatgpt.com

MultispeQ V 2.0. *PhotosynQ.* URL: <https://www.photosynq.com/product-page/multispeq-v-2-0>

N-Tester BT – to measure leaf nitrogen in the crop. Yara UK Ltd. URL: https://www.yara.co.uk/crop-nutrition/farmers-toolbox/n-tester-bt/?utm_source=chatgpt.com

Додатки

Прилад	Виробник (країна)	Що вимірює	Принцип вимірювання	Площа / діапазон	Повторюваність / точність	Орієнтовна ціна / доступність	Коротка рекомендація
MPM-100	Opti-Sciences / ADC (США / UK дилери)	Хлорофіл (T850/T720), флавоноли (F660/F325), антоціани (F660/F525), NFI	Ratio fluorescence + transmittance (комбіноване)	зона 9.5 mm діаметром; швидкі одиничні вимірювання	Repeatability ±1% (брошура), <±2% шум.	Зазвичай — за запитом (дистриб'ютори); брошури/технічні дані відкриті.	Комплексний польовий профіль пігментів; підходить для досліджень адаптації й виноградарства.
SPAD-502Plus	Konica Minolta (Японія)	Відносний індекс хлорофілу (SPAD)	Пропуск/поглинання у двох хвилях → SPAD-індекс	Дуже мала зона кліпу (типово ~6–7 mm)	Відтворюваність хороша; IPX-4 захист; точність у межах робочого діапазону (див. інструкцію).	Роздрібні пропозиції ~2000–3500 USD залежно від постачальника.	Надійний стандарт для швидкого визначення азотного статусу культури; дешевий за мультиспектральні прилади.
CCM-300	Opti-Sciences (США)	Хлорофіл (прямий readout $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)	Fluorescence ratio	Ширший діапазон, працює з дуже маленькими/тонкими зразками; 41–675 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	Висока кореляція з хімічними аналізами (згідно брошури)	За запитом; дистриб'ютори.	Коли потрібен точний кількісний хлорофіл по всьому діапазону (від схожих до високих значень).
Dualex (DUALEX® Scientific)	Force-A (Франція)	Хлорофіл, флавоноли, антоціани, NBI	Leaf-clip fluorescence & absorbance (UV-	Кліп-формат (типово невелика зона)	Надійний для флавоноїдів/NBI; часто застосовується	Орієнтовно €3 000–5 000 (залежно від конфігурації), згідно брошур.	Оптимальний для досліджень UV-захисту, флавоноїдів,

Прилад	Виробник (країна)	Що вимірює	Принцип вимірювання	Площа / діапазон	Повторюваність / точність	Орієнтовна ціна / доступність	Коротка рекомендація
			excited epidermal indices)		у дослідженнях стресу		порівняльних агроекспериментів.
MULTIPLEX® / Multiplex 3	FORCE-A / партнери (Франція)	Хлорофіл, флавоноли, антоціани, інші флуоресценційні індекси	Мульти-збудження флуоресценції (до 9 сигналів), активне вимірювання	Велика проаналізована поверхня у деяких версіях (до десятиків см ² у Research версії)	Швидкі (дольна секунди), може працювати за будь-якого освітлення	Комерційна ціна під замовлення; зазвичай дорожчий за прості SPAD-прилади.	Для детальних досліджень поліфенолів, виноградарства, швидкого багатомірного моніторингу.
MultispeQ (MultispeQ V2.0)	PhotosynQ (США)	Широкий набір: флуориметрія, спектроскопія, температура листка, інші	Мультисенсор: LEDs + спектральні детектори; модульний	Модульний; детектори 400–1150 nm; багато сенсорів	Специфікації: гарантія, середня точність для різних параметрів; добре документовано на сайті; ціна \$2,499 (V2.0)	Дешевший за професійні multisensor пристрої, має велику програмну підтримку мережі PhotosynQ	Чудовий для наукових проєктів із масштабним збором даних та розробки нових протоколів; потребує навичок аналізу даних.
Yara N-Tester / N-Tester BT	Yara (Норвегія / глобальна дистрибуція)	Оцінка азотного статусу листа (через хлорофілний індекс)	Кліп-сенсор (LED + фотодетектор) → N-індекс; Bluetooth для передачі у додаток	Кліп на лист	Інтеграція в агрономічні рекомендації Yara; зручний Bluetooth	Комерційно доступний через дилерів; ціни варіюються (запит через платформу Yara/Atfarm).	Для фермерських застосувань, коли потрібна інтеграція у рішення з підживлення.

Наукове видання

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка

Автори: Д. Б. Рахметов, О. П. Бондарчук, Н.М. Рашидов,
С.Т. Османов, С. О. Рахметова

МЕТОДИКА

НЕІНВАЗИВНОЇ ОЦІНКИ ФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ

ІНТРОДУКОВАНИХ ТА АВТОХТОННИХ РОСЛИН ЗА

ПОКАЗНИКАМИ ПІГМЕНТНОГО СКЛАДУ (МРМ-100)

Посібник

Відповідальний редактор – чл.-кор. НАН України, професор *Рахметов Д. Б.*

Літературний редактор *В. В. Івченко*
Технічний редактор *О. П. Бондарчук*

Керівник видавничого проєкту *Віталій Зарицький*
Комп'ютерний дизайн *Олена Щербина*

Підписано до друку 16.12.2025. Формат 60х84/16.
Папір офсетний. Друк офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. аркушів – 1,62. Обл.-вид. аркушів – 0,98.
Тираж 300

Видавець і виготовлювач: ТОВ «Видавництво Ліра-К»
Свідоцтво № 3981, серія ДК.
03115, м. Київ, вул. С. Чобану, 24
тел.: (050) 462-95-48; (067) 820-84-77
Сайт: lira-k.com.ua, редакція: zv_lira@ukr.net